

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**ПРИЛАДОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
**КАФЕДРА ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Бурау Н.І.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

## Дипломний проект

**на здобуття ступеня бакалавра з напрямку підготовки 051003 -приладобудування**  
**спеціальності 6. 05100303 – прилади і системи орієнтації та навігації**  
**на тему: «Низькочастотний сейсмоприймач»**

Виконав:

студент групи ПГ-пб1

Чепик Яна Віталіївна \_\_\_\_\_

Керівник:

доцент, к.т.н.,

Мироненко Павло Степанович \_\_\_\_\_

Рецензент:

Ст. викл.

проф. Маслов В.П. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка

	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Чепик.Я.В.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Мироненко П.С.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСОН Гр. ПГ-п61	
Н/контр.						
Зав.каф.						

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет \_\_\_\_\_ Приладобудівний \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ приладів і систем орієнтації та навігації \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології \_\_\_\_\_  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Бурау Н.І. \_\_\_\_\_  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проект (роботу) студенту**

\_\_\_\_\_ Чепик Яні Віталіївнi \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) \_\_\_\_\_ Низькочастотний сейсмоприймач \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_ Мироненко П.С., к.т.н., доцент \_\_\_\_\_,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06.2019р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Діапазон зміщень +/- 10 мм. Частотний діапазон – 5 – 200 Гц. Діапазон реєстрації швидкостей 0,1 – 10 см/с. Період власних коливань чутливого елемента 0,4 с. Температурний режим роботи ±60°С. Конструктивні параметри чутливого елемента вибирати самостійно.

						Арк.
						3
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

1. Вступ
2. Огляд засобів вимірювання вібрації.
3. Частотні характеристики сейсмоприймачів
4. Технічний опис сейсмоприймача ВИБ-А
5. Розрахунок основних елементів сейсмоприймачів з електромагнітним врівноваженням.
6. Висновок
7. Література.

1) . Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики // Мир электроники / Под ред. В.М.Шарапова. - М.: Техносфера, 2006.-632 с. ISBN 5-94836-100-4.

2). Пьезоэлектрические приборы для измерения давлений, усилий, ускорений. Проспект фирмы «Kistler Instrumene AG.» 1999. 12 с.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

1. Кінематична схема приладу
2. Збіркове креслення сейсмодатчика
3. Робочі креслення деталей сейсмодатчика
4. Ілюстративний матеріал

6. Консультанти розділів проекту (роботи)\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

8. Дата видачі завдання 10.05.2019р.

\_\_\_\_\_

					Арк.  4
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата	

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Чепик Я.В.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Мироненко П.С.

(ініціали, прізвище)

## Анотація

Дипломний проект студентки групи ПГ-пб1 Чепик Я.В. на тему «Низькочастотний сейсмоприймач». Робота складається з вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаної літератури та графічного матеріалу.

В вступній частині описується актуальність вибраної теми, та загальний опис даної теми.

В першому розділі представлені теоретичні відомості про засоби вимірювання вібрації, а саме п'єзоелектричні, індукційні, індуктивні ємнісні, тензорезисторні перетворювачі.

В другому розділі представлена розрахунково-теоретичні відомості частотної її характеристики сейсмометра.

В третьому і четвертому розділах представлений теоретичний опис повірки сейсмоприймачів та технічний опис сейсмоприймача ВИБ - А .

П'ятий розділ складається з розрахунку основних елементів сейсмоприймачі з електромагнітним врівноваження.

В висновку узагальнюється виконана робота і формулюються висновки щодо виявлених недоліків.

Робота включає 52 сторінки тексту, 2 таблиці, 15 рисунків. Для напису було використано .. джерел.

						Арк.
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		6

## Summary

Diploma project of student of group PG-p61 Chepyk Y.V. on the theme "Low-frequency seismotecturer". The work consists of an introduction, five sections, a conclusion, a list of used literature and graphic material.

The introductory part describes the relevance of the selected topic, and a general description of the topic.

The first section presents theoretical information on the means of measuring vibration, namely, piezoelectric, inductive, inductive capacitance, strain gage transducers.

The second section presents the calculation and theoretical information of the frequency characteristics of the seismometer.

The third and fourth chapters present the theoretical description of the verification of seismic receivers and a technical description of the seismic detector VIB - A.

The fifth section consists of calculating the basic elements of seismic sensors with electromagnetic equilibrium.

The conclusion summarizes the work done and formulates the findings on identified deficiencies.

The work includes 52 pages of text, 2 tables, 15 drawings. For the inscription was used .. sources.

						Арк.
						7
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗМІСТ

Вступ.....	10
Розділ 1. Огляд засобів вимірювання вібрації....	13
1.1. Вимірювання і контроль вібрації.....	13
1.2. П'єзоелектричні перетворювачі .....	17
1.3. Індукційні перетворювачі.....	20
1.4. Індуктивні перетворювачі.....	21
1.5. Ємнісні перетворювачі .....	23
1.6. Тензорезисторні перетворювачі.....	24
Розділ 2. Частотні характеристики сейсмометра .....	26
2.1. Рівняння руху сейсмометра.....	26
2.2. Класичне рішення рівняння сейсмометра.....	27
2.3. Рішення рівняння сейсмометра .....	28
2.4. Визначення параметрів сейсмометра .....	30
2.5. Визначення коефіцієнта перетворення .....	32
2.6. Генераторний метод калібрування сейсмометра.....	33
2.7. Особливості використання генераторного методу .....	34
Розділ 3. Особливості повірки сейсмоприймачів.....	35
3.1. Абсолютний метод вимірювання.....	35
3.2. Вибір датчиків переміщення.....	35
3.3. Вплив зовнішніх факторів.....	37
3.4. Вибір методу аналізу сигналів.....	39



3.5. Система для проведення повірки.....	40
Розділ 4. Технічний опис сейсмоприймача ВИБ — А.....	42
4.1. Технічні характеристики.....	42
4.2. Опис конструкції.....	43
Розділ 5. Розрахунок основних елементів сейсмоприймачів з електромагнітним зрівноваженням .....	44
Висновки.....	47
Література.....	48

						Арк.
						9
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Вступ

Сейсмоприймач - високочутливий вібровимірювальний перетворювач, який має рівномірну амплітудно-частотну характеристику в області низьких частот.

Сейсморозвідка являє собою сукупність методів досліджень геологічної будови земної кори, заснованих на вивченні поширення в ній пружних хвиль, порушуваних будь-яким джерелом сейсмічних коливань.

Переміщення частинок середовища, які викликані впливом сейсмічних хвиль, по суті - механічне явище, яке характеризує швидкість і прискорення коливального руху частинок щодо їх рівноважного стану. Безпосередньо вимірювання цих величин проблематично. Тому для цієї мети використовуються датчики (сейсмоприймачі - СП), що перетворюють коливальні рухи частинок середовища в електричні сигнали, пропорційні швидкості або прискорення цих рухів.

В даний час при проведенні сейсморозвідувальних робіт найбільше застосування мають сейсмоприймачі з вихідним сигналом, пропорційним першої похідної переміщень поверхні, і ступенем загасання менше одиниці.

Підвищення роздільної здатності сейсморозвідки вимагає створення нових первинних перетворювачів, які забезпечують в широкому діапазоні частот лінійність амплітудно-частотної характеристики, що може бути досягнуто при пропорційності вихідних сигналів другої похідної переміщень поверхні досліджуваної середовища [1]. У подібних Сейсмоприймачі пропорційність вихідного сигналу другої похідної вхідного переміщення досягається за рахунок високого ступеня загасання, що перевищує критичне значення, при цьому робочий частотний діапазон тем ширше, чим більше ступінь загасання.

Для сейсмоприймачів зі ступенем загасання менше одиниці існують методики і апаратури для визначення їх параметрів. Всі ці методи в

						Арк.
						10
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

основному представляють собою затухаючим синусоїду [2]. У нових сейсмоприймачах перехідна характеристика є аперіодична.

Будь-який первинний перетворювач може використовуватися в вимірювальних системах тільки тоді, коли простежується зв'язок між результатами досліджень, отриманих з його допомогою, з абсолютними стандартами одиниць відповідних фізичних величин. Цей зв'язок встановлюється в процесі повірки датчика. При цьому визначається ступінь точності, відтворюваності та достовірності результатів вимірювань вивіреного перетворювача, а також встановлюються межі вимірювальних діапазонів. [1] Обов'язковою перевірці підлягатиме засоби вимірювання внесений держреєстр.

Для сейсмоприймачів основними параметрами, які визначаються при перевірці, є дійсне значення коефіцієнта перетворення на базовій частоті, нерівномірність АЧХ і не лінійність АХ. При визначенні нерівномірності АЧХ проводять вимір коефіцієнта перетворення датчика в декількох точках частотного діапазону, при визначенні не лінійності АХ - в декількох точках амплітудного діапазону. Таким чином, однією із головних дій при перевірці є визначення коефіцієнта перетворення, який розраховується як показань з датчика на частоті 1 Гц займає від 10 секунд "ог 100 секунд (майже 2 хвилини). Дані розрахунки відображають мінімальний час, необхідний для вимірювань апаратурою, і не враховують час, що витрачається повірником на знімання показань вимірювального обладнання та обробку результатів вимірювань, в тому числі розрахунок прискорення зі значень переміщення для кожної частоти.

Таким чином, при проведенні вимірювань в області низьких частот особливо актуальною стає завдання автоматизації.

Сучасні засоби вимірювання дозволяють перетворювати показники датчиків переміщення в віброприскорення «на льоту» і, розділивши на нього

						Арк.
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		11

показання вивіреного датчика, відображати на екрані кінцевий результат - коефіцієнт перетворення. При необхідності може розраховуватися віброшвидкість, таким чином, автоматизовані системи дозволяють перевіряти сейсмоприймач як з виходом по прискоренню, так і з виходом за швидкістю і переміщенню.

Оскільки сейсмоприймачі є вібровимірювальними перетворювачами, визначення їх характеристик здійснюється за допомогою вібростенді. Сейсмоприёмник встановлюється на вібростенді, який відтворює коливання заданої частоти і амплітуди. Параметри коливань контролюються зразковим датчиком, за показаннями якого визначається відтворюється віброприскорення  $A$ .

При визначенні параметрів вібровимірювальних перетворювачів, як правило, застосовується відносний метод вимірювань, при якому в якості зразкового датчика використовується акселерометр, який встановлюється співвісно з вивіреном датчиком. Таким чином, на датчики впливає ідентичне прискорення, і показання зразкового акселерометра використовуються для визначення коефіцієнта перетворення вивіреного датчика за формулою (1). Рекомендований рівень віброприскорення при проведенні вібровипробування відносним методом згідно з ГОСТ Р 8.669-2009 повинен становити не менше  $10 \text{ м} / \text{с}^2$  [2]. У таблиці 1 наведені значення переміщень, які забезпечують віброприскорення  $10 \text{ м} / \text{с}^2$  на різних частотах. Більшість вібростенді середнього класу мають робочу амплітуду вібропереміщень  $1 + 2 \text{ мм}$ . З таблиці видно, що такі вібростенди не дозволяють проводити випробування на частотах нижче 10 Гц.

						Арк.
						12
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Розділ 1. Огляд засобів вимірювання вібрації

### 1. Вимірювання і контроль вібрацій.

Самою простою вібрацією є гармонійна вібрація, це коли тіло здійснює синусоїдальні коливання. При цьому зміщення коливної точки  $s$  (вібропереміщення) в момент часу  $t$ :

$$s = s_a (\sin \omega t + \varphi), \quad (1.1)$$

або

$$s = s_a (\cos \omega t + \varphi), \quad (1.2)$$

де  $s_a$  - амплітуда зміщення;

$\omega = 2\pi f$  - кругова частота коливань;

$f = 1 / \tau$  - частота коливань;

$\tau$  - період коливань;

$\varphi$ -початкова фаза коливань.

Найпростіший вид вібрації - це коливання або повторюваний рух об'єкта біля положення рівноваги. Цей тип вібрації можна назвати загальною вібрацією, тому що тіло переміщається як єдине ціле і всі його частини мають однакову за величиною і напрямком швидкість. Положенням рівноваги називають такий стан, в якому тіло перебуває в стані спокою або положення яке воно займе, якщо сума діючих на нього сил дорівнює нулю. Коливальний рух твердого тіла може бути повністю описано у вигляді комбінації шести найпростіших типів руху: поступального в трьох взаємно перпендикулярних напрямках ( $x, y, z$  в декартовій системі координат) і обертального щодо трьох взаємно перпендикулярних осей ( $Ox, Oy, Oz$ ). Будь яке складне переміщення тіла можна розкласти на ці шість простих складових. Тому про такі тілах кажуть, що вони мають шість ступенів свободи.

Наприклад, корабель може переміщатися в напрямку осі «корми-ніс», підніматися і опускатися вгору вниз, рухатися в напрямку осі правий

						Арк.
						13
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

борт лівий борт, а також обертатися щодо вертикальної осі і відчувати бокову і кільцеву качку [1].

Уявімо собі якийсь об'єкт, переміщення якого обмежені одним напрямком, наприклад, маятник настінного годинника. Така система називається системою з одним ступенем свободи, тому що становище маятника в будь-який момент часу може бути визначено одним параметром в точці закріплення.

Іншим прикладом системи з одним ступенем свободи є ліфт, який може переміщатися тільки вгору і вниз уздовж стовбура шахти. Вібрація тіла завжди викликається якимись силами збудження. Ці сили можуть бути додані до об'єкта ззовні або виникати всередині нього самого. Далі ми побачимо, що вібрація конкретного об'єкта повністю визначається силою збудження, її напрямком і частотою. Саме з цієї причини вібраційний аналіз дозволяє виявити сили збудження при роботі машини. Ці сили залежать від стану машини, знання їх характеристик і законів взаємодії дозволяє діагностувати вади останньої [3].

Вимірювання і контроль вібрацій необхідні в багатьох областях промисловості: в мікроелектроніці, машинобудуванні, енергетиці, авіабудуванні, на залізничному транспорті і т. д. Для того щоб задовольняти основним сучасним вимогам вимірювань вібрацій, пристрої повинні забезпечувати безконтактний спосіб, високий дозвіл вимірювань зміщення поверхні (10 ... 100 нм), як найбільшу робочу відстань до об'єкта (виніс на кілька метрів), можливість роботи з високочастотними вібраціями поверхні об'єкта (10<sup>3</sup> ... 10<sup>4</sup> Гц) [1].

У безпілотних літальних апаратах і повітряних судах за допомогою інерційної навігаційної системи здійснюється замір і обчислення навігаційних параметрів і надається інформація для екіпажу і різних електронних систем. При цьому в системах автоматичного керування

						Арк.
						14
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

траєкторією польоту, контролю та управління двигунами літальних апаратів широко використовуються сигнали акселерометрів. Так, наприклад, для вимірювання лінійного прискорення літального апарату використовуються параметричні перетворювачі, а для вимірювань вібрацій двигунів застосовуються - генераторні перетворювачі. Існуючі акселерометри, в залежності від розв'язуваної задачі, вимірюють тільки лінійне, кутове прискорення або вібрацію. Тут, зменшення маси та габаритних показників, збільшення ефективності та інформативності вимірювань є одним із пріоритетних завдань приладобудування [2].

Найпростішими з існуючих в природі коливання є пружні прямолінійні коливання тіла на пружині (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Приклад простого коливання.

Така механічна система володіє одним ступенем свободи. Якщо відвести тіло на деяку відстань від положення рівноваги і відпустити, то пружина поверне його(тіло) в точку рівноваги. Однак тіло здобуде при цьому певну кінетичну енергію, проскочить точку рівноваги і деформує пружину в протилежному напрямку. Після цього швидкість тіла почне зменшуватися, поки воно не зупиниться в іншій крайній позиції, звідки стиснена або розтягнута пружина знову почне повертати тіло назад в положення рівноваги. Такий процес буде повторюватися знову і знову, при цьому

відбувається безперервне перетікання енергії від тіла (кінетична енергія) до пружини (потенційна енергія) і назад.

На рис.1.1 представлений також графік залежності переміщення тіла від часу. Якби в системі було відсутнє тертя, то ці коливання тривали б безперервно і нескінченно довго з постійними амплітудою і частотою. У реальних механічних системах такі ідеальні гармонійні системи руху не зустрічаються. Будь-яка реальна система має силу тертя, яка призводить до поступового згасання амплітуди і перетворює енергію коливань в тепло [3].

Найпростіше гармонійне переміщення описується наступними параметрами:

$T$  - період коливань,

$f$  - частота коливань,  $1 / T$ .

Період - це інтервал часу, який необхідний для завершення одного циклу коливання, тобто це час між двома послідовними моментами перетинання нульової точки в одному напрямку. Залежно від швидкості коливань, період вимірюють в секундах або мілісекундах.

Частота коливань - величина зворотна до періоду, визначає кількість циклів коливання за період, вона вимірюється в герцах ( $1 \text{ Гц} = 1/\text{секунду}$ ). Коли розглядаються обертові машини, то частота основного коливання відповідає частоті обертання, яка вимірюється в об/хв ( $1/\text{хв}$ ) і визначається як:

$$\omega = f \cdot 60 \quad (1.3)$$

де  $f$ - частота в Гц, помножена на 1 хв (60 секунд) [8].

Невелике компактне тіло, наприклад, шматочок мармуру, можна уявити як просту матеріальну точку. Якщо прикласти до неї зовнішню силу, вона прийде в рух, який визначається законами Ньютона. У спрощеному вигляді, закони Ньютона свідчать, що тіло, що знаходиться в стані спокою буде залишатися у ньому, якщо на нього не діє зовнішня сила. Якщо ж до

						Арк.
						16
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		



матеріальної точці прикладена зовнішня сила, то вона прийде в рух з прискоренням, пропорційним цій силі [6].

Вібраційний датчик - пристрій, що генерує електричний сигнал, пропорційний вимірюваному параметру вібраційного процесу. При вимірюванні параметрів вібрації використовуються датчики: проксиметри - для вимірювання вібропереміщення; велосіметри - для вимірювання віброшвидкості; акселерометри генеруючі сигнал, пропорційний віброприскоренню [2].

Розглянемо конструкцію та принцип дії засобів вимірювання вібрації, а саме:

- п'єзоелектричний;
- індукційний;
- індуктивний;
- ємнісний ;
- тензорезисторний перетворювачі.

## **1.2. П'єзоелектричні перетворювачі**

В даний час для вимірювання динамічних процесів, таких як імпульси тиску, вібрації і т.д. Найбільш широко застосовуються п'єзоелектричні перетворювачі, дія яких заснована на прямому п'єзоефекті в деяких кристалічних матеріалах.

Раніше п'єзоелектричні перетворювачі використовували тільки при вимірюванні прискорень в високочастотному діапазоні вібрацій. Зараз розроблені системи, що дозволяють використовувати подібні перетворювачі для вимірювання віброшвидкості і вібропереміщення при частотах вібрації від одиниць і навіть десятих часток герца.

						Арк.
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		17

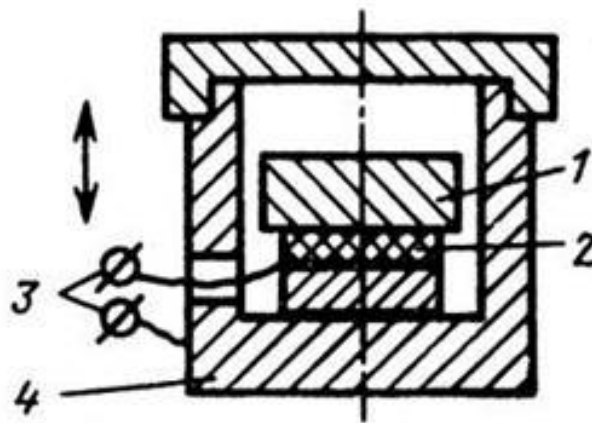


Рис.1.2 Конструкція найпростішого п'єзоелектричного перетворювача

Як і більшість інших датчиків вібрації п'єзоелектричні перетворювачі побудовані за принципом сейсмічних датчиків (рис.1.3). Інерційний елемент (сейсмічна маса) прикріплений до верхньої межі п'єзоелемента, нижня межа якого кріпиться до корпусу.

При установці перетворювача на досліджуваному об'єкті перетворювач сприймає вібрацію об'єкта. Внаслідок прагнення інерційного елемента зберегти стані спокою, п'єзоелемент деформується від дії на нього інерційної сили  $F = ma$ , де  $m$  - маса інерційного елемента,  $a$  - прискорення об'єкта. Так як деформація п'єзоелемента і виникає при цьому електричний заряд пропорційний прискоренню, то ці перетворювачі часто називають п'єзо акселерометрів [3].

					Арк.
					18
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата	

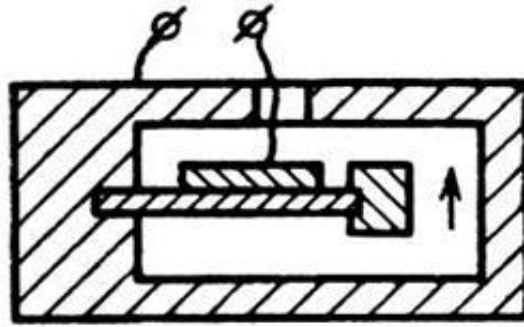


Рис.1.3 Конструкція високочутливого акселерометра

Основними достоїнствами п'єзо акселерометрів є широкий діапазон робочих частот, мала чутливість до магнітних полів, велика вібраційна і ударна міцність, можливість створення перетворювачів з малими розмірами і масою.

Для підвищення ударної міцності застосовують додаткове притискання інерційної маси до п'єзоелементів, як це зроблено в акселерометрах типу 1Па-6 і 1Па-7.

Для підвищення чутливості перетворювачів збільшують інерційну масу, застосовують п'єзокераміки, які володіють високим п'єзо модуль, а також використовують згинальну деформації п'єзоелемента. Як приклад високочутливих акселерометрами, побудованих з використанням принципу вигинистих деформацій, можна привести вітчизняні акселерометри Д19, ІС-598 і ІС-598А.

Поряд з чутливістю, однією з найважливіших характеристик датчиків вібрації є частотний діапазон. Для зниження нижньої межі частотного діапазону в якості попередніх підсилювачів застосовують підсилювачі заряду, а збільшення верхньої граничної частоти досягається зниженням маси датчика і якісним кріпленням його до об'єкту (наприклад, за допомогою нарізного сполучення). Для зменшення маси корпусу акселерометра його виготовляють з матеріалів малої щільності типу титану і алюмінію.

						Арк.
						19
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 Характеристики п'єзоелектричних перетворювачів

Модель	Чутливість мВ*с <sup>2</sup> /м	Fr Гц	Граничне прискорення м/с <sup>2</sup>	Маса, г	Розміри, мм
Вітчизняні					
ИС-312	0,05-0,15	80	2000	22	-
1ПА-6	3,0-4,0	25	10000	48	Ø20×30
1ПА-7	0,5	48	15000	30	Ø20×24
Д-14	2,5	28	10000	27	Ø16×29
Д-19	20	-	-	100	Ø42,5×43,5
«Брюль і Кьер»					
4349	0,6-1,2	40-50	20000	18	-
4332	6	25	1000	30	Ø17×22
4335	2	35	2000	18	Ø14×20

Наведена в таблиці резонансна частота  $f_p$  у більшості датчиків пов'язана з верхньою межею частотного діапазону  $f_v$  співвідношенням:

$$f_v = 0,3f_p \quad (1.4)$$

### 1.3.Індукційні перетворювачі

Індукційні перетворювачі вібрації (як і п'єзоелектричні) відносяться до датчиків генераторного типу. Принцип дії індукційних перетворювачів заснований на явищі електромагнітної індукції, тобто на виникненні електрорушійної сили (ЕРС) в електричній котушці при зміні магнітного поля. Таким чином, в них вимірюється віброшвидкість, так як саме вона викликає зміна магнітного поля в датчику. Тому чутливість таких датчиків характеризується величиною напруга / віброшвидкості, (В / м / с).

До переваг індукційних перетворювачів можна віднести простоту конструкції і надійність в експлуатації. Основний їх недолік пов'язаний з

						Арк.
						20
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

принципом дії, практично обмежує нижній діапазон вимірюваних частот межею 8 - 10 Гц. Крім того, індукційні перетворювачі мають значно більшу масу, ніж п'єзоелектричні, що знижує максимальне значення вимірюваних частот до 500- 1500 Гц.

Конструктивно індукційний перетворювач складається з корпусу, сейсмічної маси на маятникової або осьової підвісці і індукційного елемента. При коливаннях сейсмічної маси відбувається відносне переміщення котушки і постійного магніту спеціальної форми, в результаті чого в котушці наводиться ЕРС. Для підвищення чутливості перетворювача збільшують число витків котушки. Але збільшення числа витків призводить до підвищення реактивного опору котушки і збільшення маси перетворювача, а отже, до зменшення частотного допустимі межі з боку високих частот.

Багато з існуючих індукційних перетворювачів володіють чутливістю, достатньої для реєстрації вимірювального електричного сигналу без додаткового посилення.

#### 1.4.Індуктивні перетворювач

Індуктивний перетворювач є параметричним - переміщення одного з його елементів при вібрації викликає зміна індуктивності системи і її опору змінному струмі.

Таблиця 1.2.Характеристики індукційних перетворювачів.

Модель	Коефіцієнт електромеханічного зв'язку, Вс/м	Габаритні Розміри, мм	Маса, кг
И001	12	135×75×75	1,5
И002	0,8	185×172×160	4
ВИБ-А	10-30	340×160×145	10,6
СТКД	3-4	700×380×300	30
СВКД	2-3	700×366×300	40
ДС-В	400	856×366×422	70
ВДК	-	Ø52×110	0,47

В таблиці 1.2. представлені основні схеми побудови індуктивних перетворювачів - зі змінною площею зазору, зі змінною довжиною зазору і з рухомим циліндричним сердечником. Для всіх варіантів зазвичай використовується диференціальна бруківка схема включення.

Індуктивні перетворювачі мають набагато меншу масу, ніж індукційні, проте, область їх застосування обмежена виміром низькочастотних вібрацій. Це пов'язано з тим, що частота струму живлення (несучого сигналу) не може перевищувати 3 5 кГц через виникнення вихрових магнітних потоків в осерді та значних паразитних ємностей і індуктивності сполучних проводів. При цьому для надійної роботи перетворювача необхідно, щоб частота вимірюваного процесу була в 5 - 10 разів нижче частоти несучого сигналу.

Основною перевагою індуктивних перетворювачів є їх простота, можливість застосування при підвищених температурах і висока чутливість.

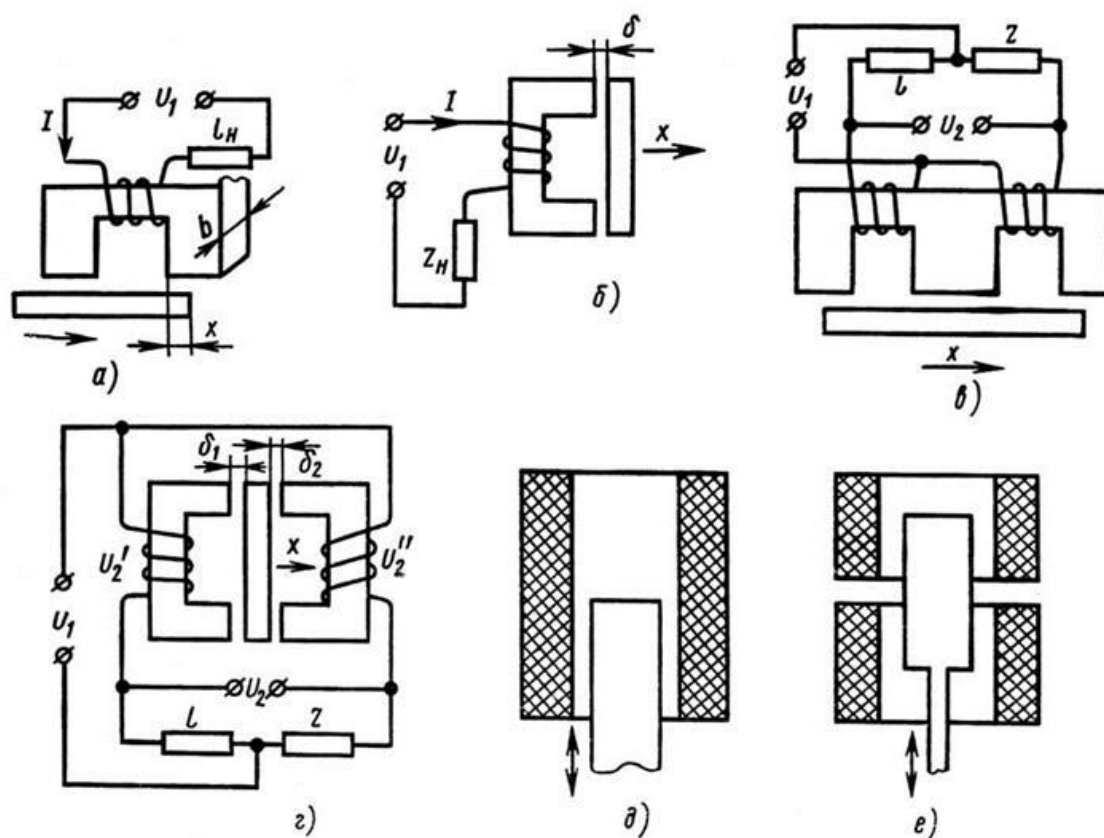


Рис.1.4. Схеми індуктивних перетворювачів

### 1.5.Ємнісні перетворювачі

Одним з найбільш поширених класів параметричних перетворювачів параметрів вібрації є ємнісні вимірювальні перетворювачі. Вони складаються з рухомої і нерухомої частин, відносно переміщення яких призводить до зміни ємності перетворювача:

$$C = 0,866 \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \quad (1.5)$$

де:

$\varepsilon$  - діелектрична проникність середовища;

$S$  - площа перекриття пластин перетворювача;

$d$  – відстань між пластинами.

Зміна ємності перетворювача відбувається при зміні будь-якого параметра, що входить в формулу, тому виділяють три основні конструкції ємнісних датчиків вібрації.

Однією з основних завдань, що вирішуються при створенні ємнісних перетворювачів, є збільшення їх ємності. Оскільки в більшості випадків збільшення площі пластин обмежена допустимими габаритами, то це завдання зазвичай вирішується зменшенням зазору. В цьому випадку до якості матеріалів і захищеності зазору від вологи і пилу визначаються особливо жорсткі вимоги.

Таблиця 1.6.1. Технічні характеристики ємнісних перетворювачів

Тип	Призначення	Діапазон вимірювальних переміщень, мм	Частота діапазону, Гц
ММ0004	Вимірювання вібропереміщення	10% від відстані до віброуючої поверхні	0,2-200
51Д05	Контактний датчик зміщення	0-10 0-70	0-100
51Д11 51Д21	Безконтактний датчик вібрації	0,1-1000	0-1000
51Д07	Сейсмічний датчик крутильних коливань	$\pm 2$ $\pm 5$	0,018-1,5

## 1.6.Тензорезисторні перетворювачі

Для вимірювання вібрацій частотою кілька десятків герц можуть бути використані перетворювачі, в яких за допомогою тензорезисторів відбувається вимір деформації чутливого елемента, що з'єднує сейсмічну масу з корпусом перетворювача. Основні схеми вимірників прискорення наведені на рисунку 1.5.

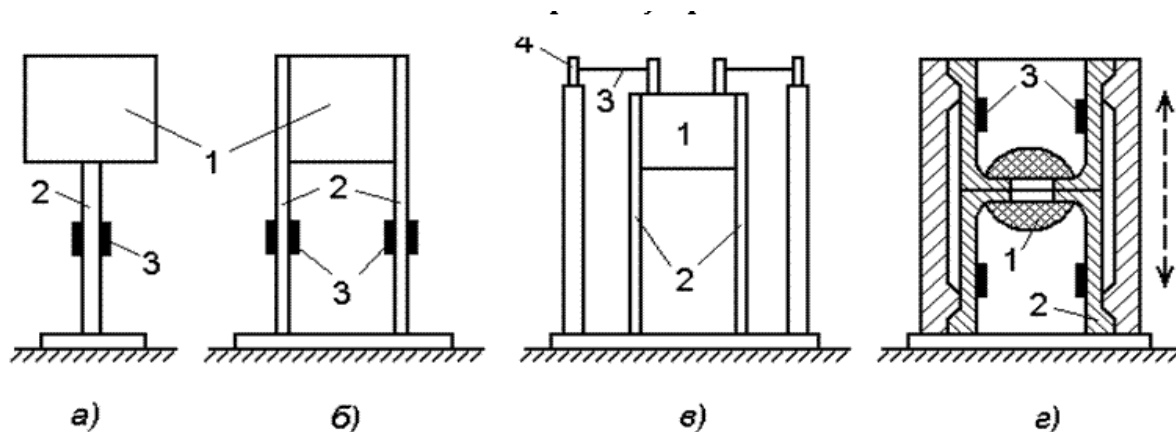


Рис.1.5. Основні схеми вимірювачів прискорення

Вимірювач, показаний на малюнку 1.4а, простий по конструкції складається з підстави і чутливого елемента 2, виконаного у вигляді консольної балки з наклеєними на неї тензорезисторами 3. На кінці балки укріплена сейсмічна маса 1.

На рис.1.5. б, показаний вимірювач, чутливий елемент якого являє собою пару паралельних консольних балок 2 з тензорезисторами 3, на яких закріплена інерційна маса 1. Така конструкція забезпечує паралельність переміщення інерційної маси.

Тензорезисторний вимірювач прискорень типу МП-02 побудований за схемою, показаної на рис.1.5. в. Для визначення переміщень сейсмічної маси 1, що кріпиться до корпусу за допомогою двох плоских пружин 2, служать підвісні тензорезисторні решітки 3. Для виключення деформації опорних штифтів 4 їх виконують з рубіна.

Перетворювачі МП-02 випускають в двох модифікаціях - для вимірювання прискорень  $\pm 60 \text{ м / с}^2$  в частотному діапазоні до 10 Гц і

					Арк.
					24
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата	



прискорень  $\pm 150 \text{ м / с}^2$  в частотному діапазоні до 20 Гц.

Конструкція показана на малюнку 1.4 де реалізується в вимірювачах великих прискорень. Чутливий елемент являє собою пару циліндричних склянок 2, з наклеєними уздовж поздовжньої осі тензорезисторами 3.

Роль інерційної маси виконують з'єднані днища склянок і маса 1, закріплена на них.

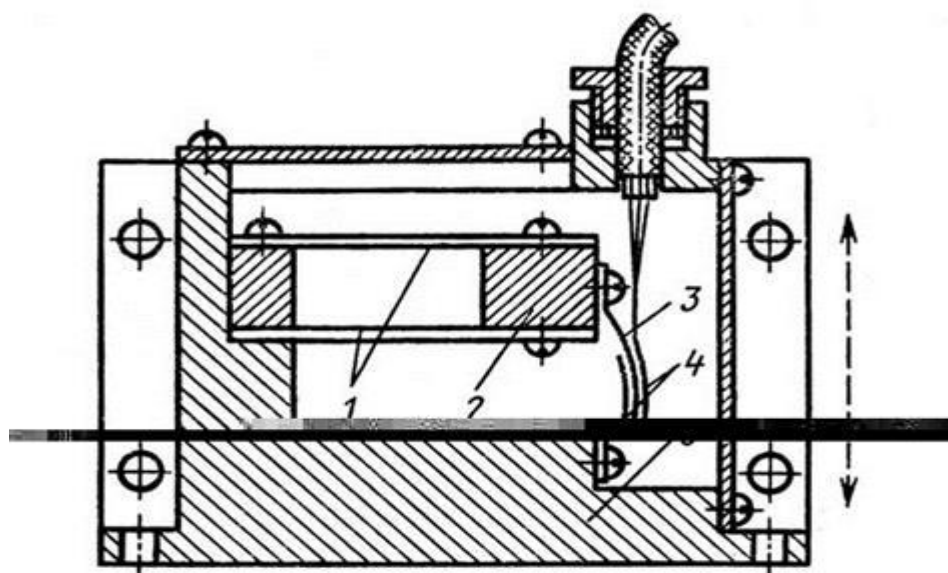


Рис.1.6. Тензорезисторний вимірювач прискорення АП-02

Тензорезисторний вимірювач прискорення АП-02:

- 1- плоскі пружини;
- 2- інерційна маса;
- 3- чутливий елемент;
- 4-тензорезистори;
- 5-корпус.

					Арк. 25
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата	

## Розділ 2. Частотні характеристики сейсмометра

### 2.1. Рівняння руху сейсмометра

При  $t \leq 0$   $x(t) = y_m(t) = 0$  - маятник знаходиться в положенні рівноваги. Нехай в момент часу  $t = 0$  основа сейсмометра починає зміщуватися  $x(t)$ , тоді інертна маса починає рух щодо основи сейсмометра.

Сила що впливає на масу: —  $m \ddot{y}$

Перешкоджаючі сили:

- сила пружності:  $-k (y_m(t) - x(t))$  (2.1)

- сила згагасання:  $-c(\dot{y}_m(t) - \dot{x}(t))$  (2.2)

Згідно 2-го закону Ньютона рівняння руху інертної маси може бути записано в наступному вигляді:

$$m\ddot{y}_m(t) + c(\dot{y}_m(t) - \dot{x}(t)) + k(y_m(t) - x(t)) = 0 \quad (2.3)$$

ведемо позначення:

$$2D = c\omega_0/m, \omega_0^2 = k/m \quad (2.4)$$

Рівняння руху сейсмометра:

$$\ddot{Y}(t) + 2D\omega_0\dot{Y}(t) + \omega_0^2 Y(t) = -\ddot{x}(t) \quad (2.5)$$

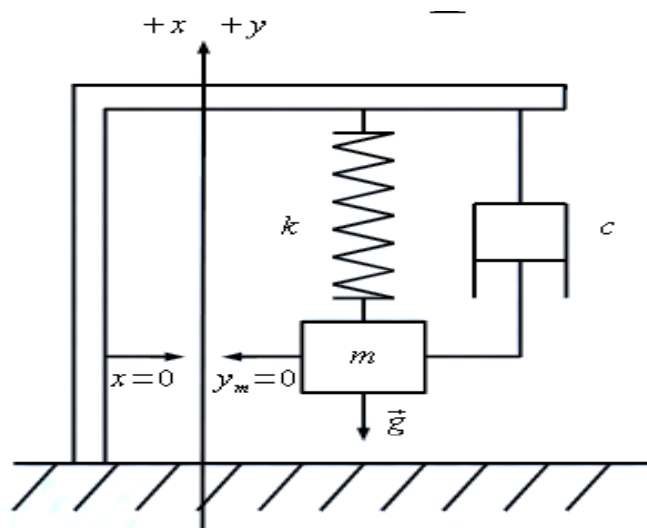


Рис.2.1. Кінематична схема сейсмометра

$x(t)$  — положення основи сейсмометра,

$y_m(t)$  - положення інерційної маси сейсмометра, відносно обраної осі,

$y(t) = y_m(t) - x(t)$  - переміщення інертної маси сейсмометра, щодо заснування,

$m$  - маса маятника,

$k$  - коефіцієнт пружності пружини,

$c$  - загасання, пропорційне швидкості,

$l_0$  - довжина пружини без навантаження при відсутності сили тяжіння

## 2.2. Рішення рівняння сейсмометра

Припустимо, що основа сейсмометра рухається за гармонійним законом з частотою  $\omega$ :

$$x_u = A_i e^{j\omega t} \quad (2.6)$$

Тоді:

$$\ddot{x}(t) = -\omega^2 A_i e^{j\omega t}, \quad y(t) = A_0 e^{j\omega t}, \quad \dot{y}(t) = j\omega A_0 e^{j\omega t}, \quad \ddot{y}(t) = -\omega^2 A_0 e^{j\omega t} \quad (2.7)$$

Рівняння руху можна записати так:

$$-\omega A_0 + 2\beta j \omega A_0 + \omega^2 A_0 = \omega^2 A_i, \quad (2.8)$$

Визначимо загасання, як  $D = \beta L \omega_0$ , тоді частотна характеристика набуде вигляду:

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{A_0}{A_i} = \frac{\omega^2}{-\omega^2 + j2\beta\omega + \omega_0^2} \quad (2.9)$$

Модуль цієї характеристики є амплітудно-частотна характеристика (АЧХ):

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2})^2 + 4D^2 \frac{\omega_0^2}{\omega^2}}} \quad (2.10)$$

Фазово-частотна характеристика (ФЧХ) може бути представлена виразом:

$$\Phi(\omega) = \arctg \frac{-2D\omega/\omega_0}{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}} \quad (2.11)$$

						Арк.
						27
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

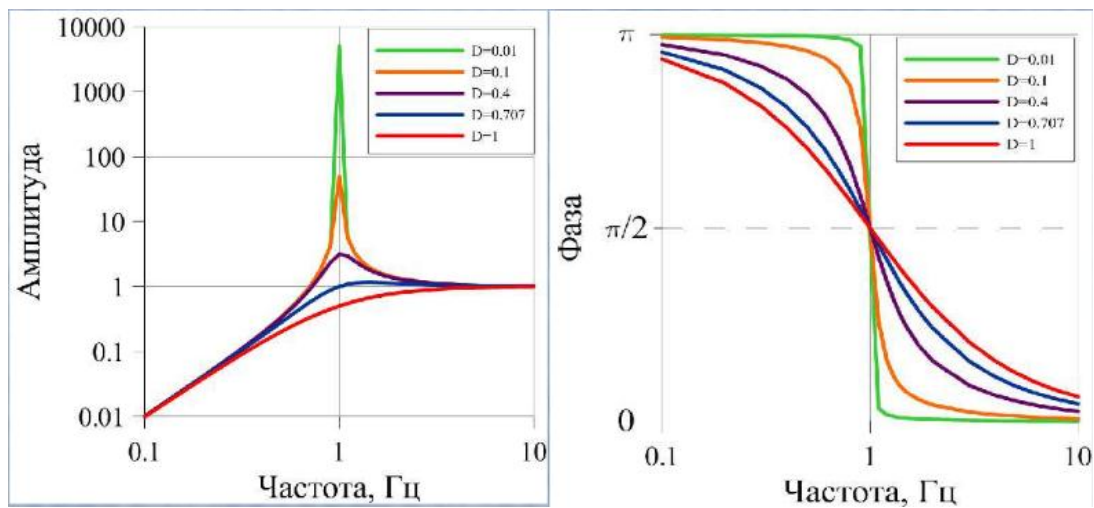


Рис 2.2. Графіки АЧХ та ФЧХ сейсмоприймача

### 2.3.Рішення рівняння сейсмометра

Якщо  $X(s)$  і  $Y(s)$  є перетворення Лапласа від функцій  $x(t)$  і  $y(t)$ , то застосувавши перетворення Лапласа до рівняння сейсмометра, отримаємо:

$$s^2 Y(s) - sy(0) - \dot{y}(0) + 2D[sY(s) - y(0)] + \omega^2 Y(s) = -[s^2 X(s) - sx(0) - \dot{x}(0)] \quad (2.12)$$

Якщо припустити, що в момент часу  $t = 0$  основа сейсмометра і інертна маса знаходяться в положенні рівноваги, тобто  $X(0)$  і  $Y(0)$ , а також їх похідні дорівнюють 0, то частотна характеристика може бути записана у вигляді:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = -\frac{s^2}{s^2 + 2Ds + \omega_0^2} = -\frac{(s-0)(s-0)}{[s + \omega_0(D + j\sqrt{1-D^2})][s + \omega_0(D - j\sqrt{1-D^2})]} \quad (2.13)$$

В загальному випадку можна записати:

$$H(s) = -K \frac{(s-n_1)(s-n_2)\dots(s-n_k)}{(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_l)} \quad (2.14)$$

де:

$K$  — масштабний коефіцієнт,

$n_1, n_2, \dots, n_l$  — нулі передатної функції,

$p_1, p_2, \dots, p_l$  — її полюси.

Масштабний коефіцієнт  $K$ , нулі і полюси повністю визначають частотну характеристику системи.

Для найпростішого сейсмометра, яким є сейсмоприймач ВИБ-А, частотну характеристику можна представити у вигляді:

$$H(s) = -K \frac{(s-n_1)(s-n_2)}{(s-p_1)(s-p_2)} \quad (2.15)$$

Де:

$$p_1 = -\omega_0 (D + j\sqrt{1-D^2}) = -\frac{2\pi}{T_s} (D + j\sqrt{1-D^2}) \quad (2.16)$$

$$p_2 = -\omega_0 (D - j\sqrt{1-D^2}) = -\frac{2\pi}{T_s} (D - j\sqrt{1-D^2})$$

$$n_1 = n_2 = 0$$

Знаючи, що перетворення Лапласа похідної від функції  $y'(t) \in sY(t)$ , можна записати частотну характеристику для сейсмометра, у якого сигнал на виході пропорційний швидкості:

$$H_x = \frac{sY(s)}{X(s)} = -K_1 \frac{s^3}{(s-p_1)(s-p_2)} \quad (2.17)$$

Де:

$H_x$  — частотна характеристика сейсмометра з магнітоелектричним перетворювачем для перерахунку в віброзміщення.

$H_v = H_x/s$  — частотна характеристика сейсмометра з магнітоелектричним перетворювачем для перерахунку в віброшвидкість.

$H_a = H_x/s^2$  — частотна характеристика сейсмометра зі магнітоелектричним перетворювачем для перерахунку в віброприскорення.

## 2.4. Визначення параметрів сейсмометра

1. Момент інерції  $K_s$  і приведена довжина  $l_s$ . Знімається маятник, замість шарнірів підвісів вставляється спеціальні ножі (див. Рис. 1), проводиться виміри періоду вільних коливань маятника щодо штатної осі (рис. 2) —  $T_{sm}$  і смещённой осі (рис. 3) —  $T_{sm}'$ . У кожному разі маятник легким поштовхом відхиляється на невеликий кут ( $\sim 10$  градусів) і за секундоміром вимірюється час  $t_{100}$ ста повних коливань. Періоди визначаються за формулою  $T_{sm} = t_{100}/100$ .

Для розрахунків використовуються наступні вирази:

$$l_s = \frac{g}{4\pi^2} T_{sm}^2 \quad l_s' = \frac{g}{4\pi^2} T_{sm}'^2 \quad (2.18)$$

$$K_s = M \cdot \Delta R_0 \cdot l_s \frac{l_s - \Delta R_0}{l_s - l_s' + 2\Delta R_0} \quad (2.19)$$

тут:

$M$  - маса маятника з ножами

$\Delta R_0$  — відстань між лезами ножовий опори

2. Активний опір котушок сейсмометра вимірюється мостом змінного струму при відсутності моста - омметром або тестером в режимі омметра. Сейсмометр повинен бути зааретірован.

3. Період власних коливань сейсмометра  $T_s$  визначається на зібраному сейсмометрів при розімкнутих котушках. Маятник сейсмометра легким поштовхом виводиться з положення рівноваги, вимірюється час 10-ти повних коливань  $t_{10}$ , період розраховується по формулі  $T_s = t_{10} / 10$ .

4. Коефіцієнт перетворення (чутливість) робочої  $S_{sg}$ , демфуючий  $S_{sd}$  і калібрувальної  $S_{sk}$  котушок сейсмометра визначається наступним чином:

$$S = \frac{mgr_0}{iL_x} \quad (2.20)$$

котушки по черзі включаються в схему.

						Арк.
						30
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

Де:

A - міліамперметр,

RP - магазин опорів.

У спеціальне місце на маятнику на відстані  $r_0 = 0,14\text{м}$  від осі підвісу маятника поміщається вантаж масою  $m$  кг, маятник під впливом ваги вантажу опускається.

Для повернення маятника в початкове положення в котушку подається струм  $i$ , регульований магазином опорів, Коли горизонтальна світлова лінія співпадає з вихідним положенням, робиться відлік струму по міліамперметру.

Коефіцієнт перетворення розраховується за формулою:

$$S = \frac{gmr_0}{il_s} \quad (2.20)$$

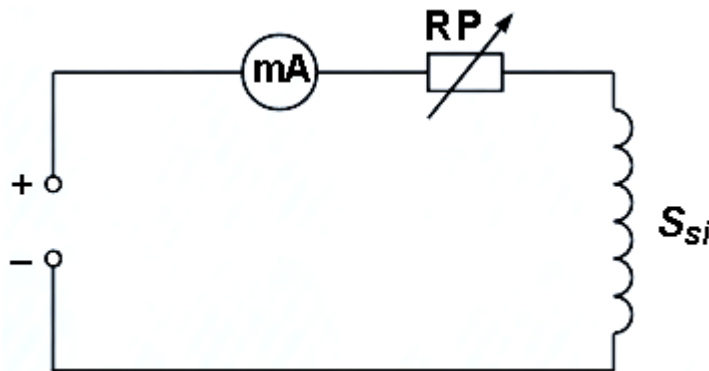


Рис.2.3. Електрична схема сейсмометра

5. Загасання сейсмометра D визначається наступним чином: маятник легким поштовхом або слабким електричним імпульсом, поданим в котушку загасання, виводиться з положення рівноваги і проводиться запис затухаючих коливань. Далі, вимірюються амплітуди коливань на записи зі зрушенням на половину періода вільних коливань:

$$A_0 = A(t_0), T_s A_1 = A(t_0 + T_s / 2), \dots, A_n = A(t_0 + nT_s / 2) \quad (2.22)$$

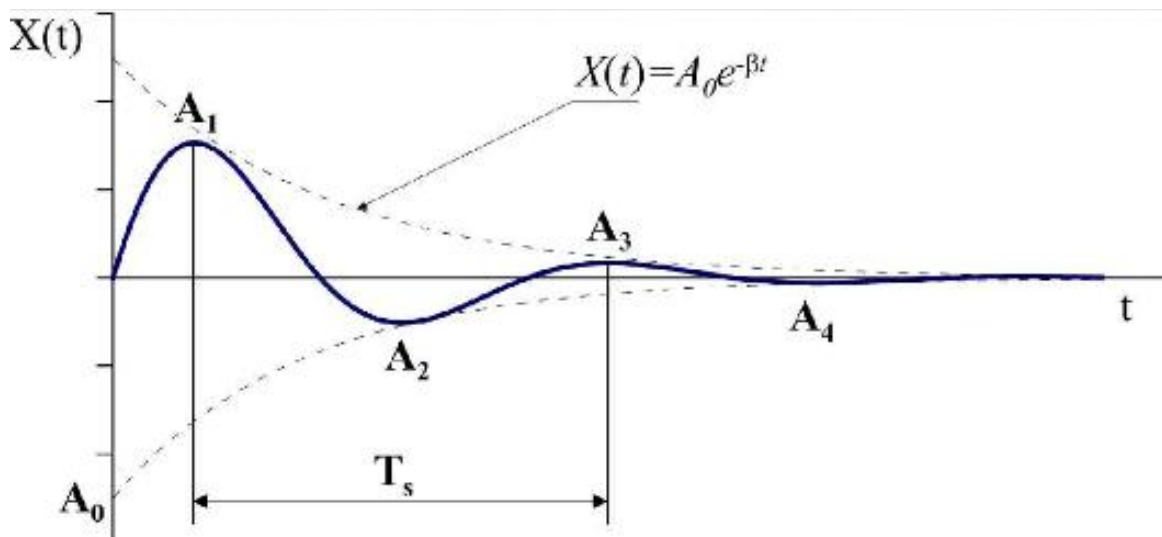


Рис.2.4.Графік загасаючих коливань сейсмографа

Загасання розраховується за формулою:

$$D = \frac{\ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right)}} \quad (2.23)$$

"Оптимального" загасання  $D=0,707$ , відповідає відношення:

$$\frac{A_n}{A_{n+1}} = 23 \quad (2.24)$$

Розрахунок опору загасання  $R_d$  здійснюється за формулою:

$$R_d = \frac{s_{sd}^2 l_s^2}{4\pi K_s f_0} - R_{sd} \quad (2.25)$$

## 2.5. Визначення коефіцієнта перетворення

Для визначення коефіцієнта перетворення необхідно подати на вхід постійний сигнал, виміряти його напруга вольтметром. Виміряти на записи зареєстрований сигнал і обчислити відношення вихідного сигналу до вхідного. Розмірність коефіцієнта перетворення - відлік / Вольт. Для підвищення точності бажано провести кілька вимірів, змінюючи полярність вхідного сигналу і / або його амплітуду, отримані результати усереднити. Таке просте визначення можливо тільки в тому випадку, коли сейсмограф не



вносить свого внеску у формування частотної характеристики: відсутня фільтрація в робочому діапазоні і т. П. Таким умовам задовольняють, наприклад, (при частоті оцифровки менше 100 Гц) , (при відключених фільтрах). Якщо ця умова нездійсненна, то необхідно проводити визначення коефіцієнта перетворення сейсмографа в усьому робочому діапазоні частот (f).

## 2.6. Генераторний метод калібрування сейсмічних каналів

Суть генераторного методу калібрування полягає в здійсненні силового збудження, коли збуджуюча сила прикладається не до основи сейсмометра, а до рухомої масі. В даному випадку ми будемо розгойдувати масу, подаючи синусоїдальний струм в калібровану, а при її відсутності в демпфуючу котушка сейсмометра.

АЧХ обчислюється за формулою:

$$|H(f)| = \frac{4\pi^2 AK_s f^2}{S_{sk} l_s^2 i} \quad (2.26)$$

A - амплітуда сигналу;

$K_s$  - момент інерції маятника;

$l_s$  - приведена довжина маятника;

$S_{sk}$  - чутливість калібрувальної котушки;

i – струм через калібрувальну котушку:

$$i = U / (R_{sk} + R_{\Gamma}) \quad (2.27)$$

$R_{sk}$  — опір калібрувальної котушки:

$R_{\Gamma}$  — баластний опір, зазвичай вибирається так, що б загальний опір кола був не менше 600 Ом

						Арк.
						33
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

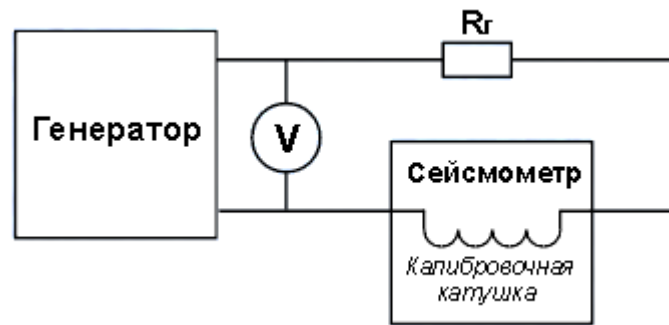


Рис.2.5. Схема для калібрування сейсмометра генераторним методом, використовуючи калібровану котушку

## 2.7.Особливості використання генераторного методу при відсутності калібрувальної котушки

У разі відсутності калібрувальної котушки (СМ-3, СМ-3В, С-5-С та ін.), або неможливістю її використання (СМ-3ос), зміниться схема підключення (див рис.2.8.) - паралельно котушці загасання, в яку ми будемо закачувати сигнал, виявляється приєднано опір загасання  $R_d$ . Загальна формула для розрахунку АЧХ залишиться зміниться незначно ( $S_{sk} \rightarrow S_{sd}$ ), Але формула для розрахунок струму, поточного через котушку, зміниться значно:

$$i = \frac{U \cdot R_d / R_{sd}}{(R_r \frac{R_d R_{sd}}{R_d + R_{sd}})(1 + \frac{R_d}{R_{sd}})} \quad (2.28)$$

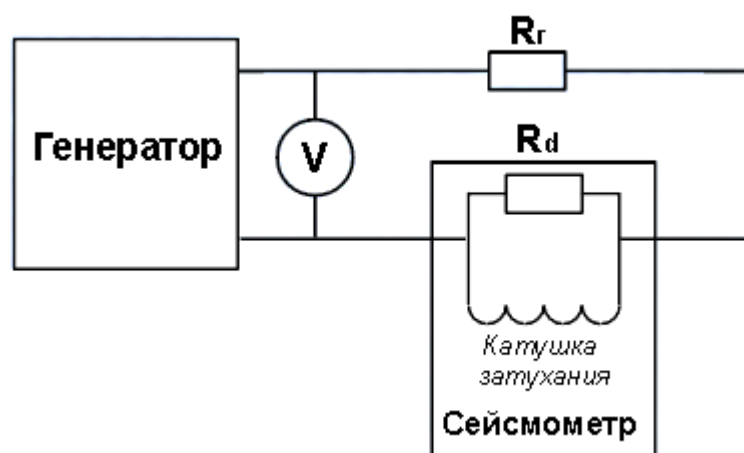


Рис.2.6. Схема для калібрування сейсмометра генераторним методом, використовуючи котушку загасання

## Розділ 3. Особливості повірки сейсмоприймачів

### 3.1. Абсолютний метод вимірювань

Для визначення параметрів вібрації можна використовувати датчики переміщення, які забезпечують набагато більшу точність вимірювань в області низьких частот у порівнянні з вібровимірювальної перетворювачами. На малюнку 1 наведені осцилограми сигналів вібродатчика (зразковий акселерометр В & К 8305) і датчика переміщень (оптичний датчик переміщень Ш7 603) на частоті 1 Гц. Неозброєним оком видно, що сигнал з вібродатчика порівнюємо з рівнем електронних шумів вимірювальної апаратури, що використовувалася при випробуваннях. При цьому з датчика переміщень реєструється «впевнений» сигнал тієї ж апаратурою в тих же умовах.

Датчики переміщення вимірюють параметри вібрації безпосередньо вивіреного сейсмоприймача, тому метод вимірювання Ч; їх використання називається абсолютним.

Застосування вузько смугового спектрального аналізу дозволяє виключити з результатів вимірювань вплив вібрацій від промислових установок, від коливань будівель, погодних і температурних впливів.

### 3.2. Вибір датчиків переміщення

Сучасний ринок пропонує велику різноманітність датчиків переміщення різних принципів дії, конструктивного виконання, метрологічних характеристик:

- Енкодери,
- ультразвукові датчики,
- індуктивні датчики.
- лазерні (оптичні) датчики.

Механічні датчики, такі як енкодери, хоч і відповідають необхідним то характеристиками, при проведенні вібровипробування не використовуються,

					Арк. 35
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата	

оскільки мають високу інерційність через механічного контакту з контрольованою поверхнею, і більше підходять для статичних вимірювань.

Принцип дії ультразвукових датчиків відстані заснований на випромінюванні імпульсів ультразвуку і вимірі, поки звуковий імпульс, відбившись від об'єкта вимірювання, повернеться назад в датчик. При цьому досягається дозвіл до 0,2 мм. При проведенні вібровипробувань потрібна велика точність вимірювань. Також обмеженням у використанні ультразвукових датчиків для вимірювання параметрів сейсмоприймач є робочий діапазон частот даних перетворювачів.

Таким чином, для визначення вібрації переміщення при проведенні вібро випробування в області низьких частот залишається вибір між оптичними і вихрово-струмовий датчиками переміщення.

Принцип роботи оптичного датчика переміщень: лазер посилає промінь через лінзу, який відбивається від об'єкта і фокусується на лінійці з фотодіодів, яка перетворює світловий сигнал в електричний. Будь-яке зміна відстані до об'єкта викликає зміна кута відбитого променя і, отже, позиції, яку відбитий промінь займає на лінійці фотодіодів. Далі обробляється сигнал від лінійки фотодіодів і перетворюється в аналоговий електричний сигнал. [3]

Чутливим елементом вихрострумових датчиків є котушка індуктивності, яка укладена в торці діелектричного наконечника. Датчик підключається до драйверу, який забезпечує збудження електромагнітних коливань в котушці, в результаті чого виникає електромагнітне поле, яке взаємодіє з матеріалом, що контролюється. Якщо матеріал має електропровідність, на його поверхні наводяться вихрові струми, які, в свою чергу, змінюють параметри котушки - її активний і індуктивний опір.

Параметри змінюються при зміні зазору між контрольованим об'єктом і торцем датчика. Драйвер перетворює ці зміни в електричний сигнал, здійснює його лінеаризацію і масштабування.

					Арк. 36
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата	

### 3.3.Вплив зовнішніх факторів

Все більш зростаючий інтерес до сейсмоприймачів пояснюється їх високою чутливістю в області низьких частот, що дозволяє застосовувати їх в системах безпеки нафтогазових комунікацій, для діагностики мостів видань, при проведенні траєкторних випробувань і в багатьох інших додатках вимірювань.

Достовірність показань будь-яких датчиків визначається при їх перевірці. Повірка вібровимірювальних перетворювачів зазвичай проводиться на віброустановці, більшість з яких дозволяє відтворювати переміщення близько  $1 + 2$  мм, що забезпечує високу якість сигналу на частотах вище 20 Гц, але на більш низьких частотах рівень сигналу з датчика порівнюємо зі значенням електронних шумів і перешкод, викликаних навколишнім середовищем. Це висуває високі вимоги до умов, в яких проводяться випробування, для мінімізації впливу на показання зовнішніх факторів.

На низьких частотах через малого рівня сигналу з датчика в результуючий сигнал набагато більший внесок, в порівнянні з вимірами на високих частотах, вносять різні перешкоди:

- теплові впливи,
- імпульсні перешкоди,
- електронні шуми,
- магнітний вплив,
- вібраційні перешкоди.

Це пов'язано з тим, що на низьких частотах при малих переміщеннях, відтворюваних більшістю вібростенді, на Вивірений датчик впливає вібро прискорення низького рівня, при цьому, сигнал, що віддають датчиком,

						Арк.
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		37

порівняємо з рівнем перешкод. Тому для отримання достовірних результатів вимірювань слід провести ряд заходів для мінімізації впливу зовнішніх факторів.

Перш за все, слід виключити імпульсні перешкоди від силових установок поблизу випробувального комплексу, оскільки на низьких частотах рівень сигналу з датчика порівняємо з рівнем електронних шумів, а імпульсні перешкоди завжди перевищують рівень електронних шумів. Таким чином, в умовах імпульсних перешкод спостерігаються скачки показань, і результат вимірювань багаторазово перевищує значення реально вимірюваного віброприскорення. Також слід максимально зменшити вплив зовнішніх магнітних полів на випробувальний комплекс.

При вимірюванні параметрів високочутливих датчиків в області низьких частот слід врахувати динамічний вплив навколишньої температури. Це коли швидка зміна навколишньої температури призводить до механічних деформацій корпусу вібродатчика, яке передається безпосередньо на п'єзoeлемент. При повільних змінах температури подібні процеси не спостерігаються. Таким чином, слід також виключити рух повітряних потоків поблизу вимірювальної установки.

Значний внесок у результати вимірювань низькочастотних сигналів також можуть вносити механічні перешкоди. Тому для проведення вимірювань параметрів вібровимірювальних перетворювачів в області низьких частот потрібні спеціалізовані приміщення, що володіють хорошою звукоізоляцією і теплоізоляцією. Будівля має бути встановлено на спеціальному фундаменті і розташоване далеко від транспортних комунікацій: автомобільних магістралей, залізниць та аеропортів.

Крім того, для виділення корисного сигналу з показань сейсмоприймачів рекомендується використовувати вузько-смуговий спектральний аналіз, який дозволяє отримувати результати на несучої частоті

						Арк.
						38
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

сигналу. Таким чином високочастотні складові, наприклад, імпульсні перешкоди, не впливають на отримані дані.

Дотримання зазначених рекомендацій дозволить звести до мінімуму вплив зовнішніх факторів на результати вимірювань сейсмоприймачів і проводити якісну перевірку вібровимірювальних перетворювачів в області низьких частот.

Примітка: осцилограми сигналів, які використовуються в даній статті, отримані за допомогою програми «Багатоканальний осцилограф» при перевірці сейсмоприймачів ВС1313 в умовах впливу різних перешкод, обробка сигналів здійснювалася аналізатором спектру 1ET017.

### **3.4.Вибір методу аналізу сигналів**

У зв'язку з тим, що на низьких частотах сигнал з датчика порівнюємо з величиною шумів вимірювальної електроніки, особливу увагу слід приділити виділенню корисного сигналу. Для цього використовується вузько-смуговий спектральний аналіз. В основі даного типу аналізу лежить принцип розкладання тимчасової реалізації сигналу в частотний спектр з рівномірним кроком по частоті за допомогою перетворення Фур'є. [5]

Для оптимізації тривалості проведення випробувань необхідно врахувати взаємозалежність ширини смуги спектра і часу накопичення сигналу. На малюнках 4 і 5 наведені спектри синусоїдального сигналу частотою 1 Гц з смугою аналізу 0,1 і 0,02 Гц, на малюнках 6 і 7 - відповідні їм прохідні характеристики аналізованих сигналів. Прохідна характеристика відображає залежність рівня сигналу від часу на певній частоті, ілюструючи процес накопичення сигналу при проведенні вузько-смугового спектрального аналізу. Чим вже смуга аналізу, тим довше проводяться вимірювання. З малюнків 4-7 видно, що збільшення смуги аналізу в 5 разів зменшує тривалість вимірювань також в 5 разів. Найбільш оптимальним рішенням є аналіз сигналу з смугою  $0,1 / \Delta f$  - частота сигналу, що відповідає часу накопичення сигналу  $10 T$ , де  $T$  - період сигналу.

						Арк.
						39
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.5. Система для проведення повірки

Схема вимірювання параметрів сейсмоприймачів за допомогою датчика переміщень. Сейсмоприймач встановлюється на вібростенді і на вібростенді відтворюються коливання заданої частоти і амплітуди. Датчик переміщень встановлюється таким чином, щоб вимірювальна вісь була паралельна напрямку вібрації, наприклад, лазерний промінь оптичного датчика переміщень повинен перпендикулярно падати на кришку вивіреного сейсмоприймачі. Управління вібростенді здійснюється генератором синусоїдального сигналу, що підключається через підсилювач потужності. Датчики підключаються до реєструючої апаратури, що здійснює вимірювання параметрів сигналу.

Використання багатоканальних аналізаторів спектра з вбудованим генератором дозволяють Кількість приладів, Які Використовують при Перевірці - один аналізатор спектру замінює генератор и два вольтметра . Крім того, застосування аналізаторів спектра дозволяє уможливити організацію зворотнього зв'язку на програмному Рівні, оскільки для управління вібростенді и вимірювання параметрів вібрації використовується один и той же прилад. Таким чином створюються автоматизовані системи повірки.

Вимірювання в області низьких частот займають тривалий час. Наприклад, період сигналу частотою 1 Гц складає 1 секунду, частотою 0,1 Гц -10 секунд. Повторюваність результатів забезпечується при вимірюванні з усередненням сигналу не менше ніж за 10 періодів. Таким чином, зняття

При розробці автоматизованих систем закладається алгоритм зміни параметрів вимірювання для кожної частоти. Оскільки тривалість вимірювань залежить від ширини смуги спектрального аналізу, підбір даного значення для кожної частоти забезпечує, з одного боку, необхідної точності повірки, а з іншого боку - мінімально можливий час вимірювань.

						Арк.
						40
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		



Крім того, автоматична корекція сигналу генератора, керуючого вібростенді, також займає набагато менше часу, ніж при проведенні вимірювань вручну, оскільки в автоматичному режимі за показаннями зразкового датчика, значенням поданого напруги і необхідним параметрам вібрації проводиться розрахунок поправки, на яку необхідно змінити напругу, що подається на вібростенд. Висока точність розрахунку дозволяє проводити корекцію напруги генератора з першого разу, в той час як при проведенні вимірювань в звичайному режимі це завдання вирішується за кілька ітерацій навіть досвідченим повірником.

Програми для перевірки сейсмоприймача в автоматичному режимі можуть бути написані на мові програмування або побудовані в середовищі графічного проектування типу SCADA (SCADA - аббр. Від англ. Supervisory Control And Data Acquisition, Диспетчерське управління та збір даних [6]). Використання графічних середовищ проектування дозволяє користувачеві вносити зміни в програму, не володіючи навиками.

						Арк.
						41
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Розділ 4. Технічний опис досліджуваного сейсмоприймача ВИБ - А

Цей прилад також маятникового типу з магнітоелектричним перетворювачем, розрахований на реєстрацію значних швидкостей зсуву об'єкта. З його допомогою можна реєструвати коливання, які мають граничне значення амплітуди зміщення до 8 - 10 см. Прилад допускає установку в вертикальному, горизонтальному і похилому положеннях.

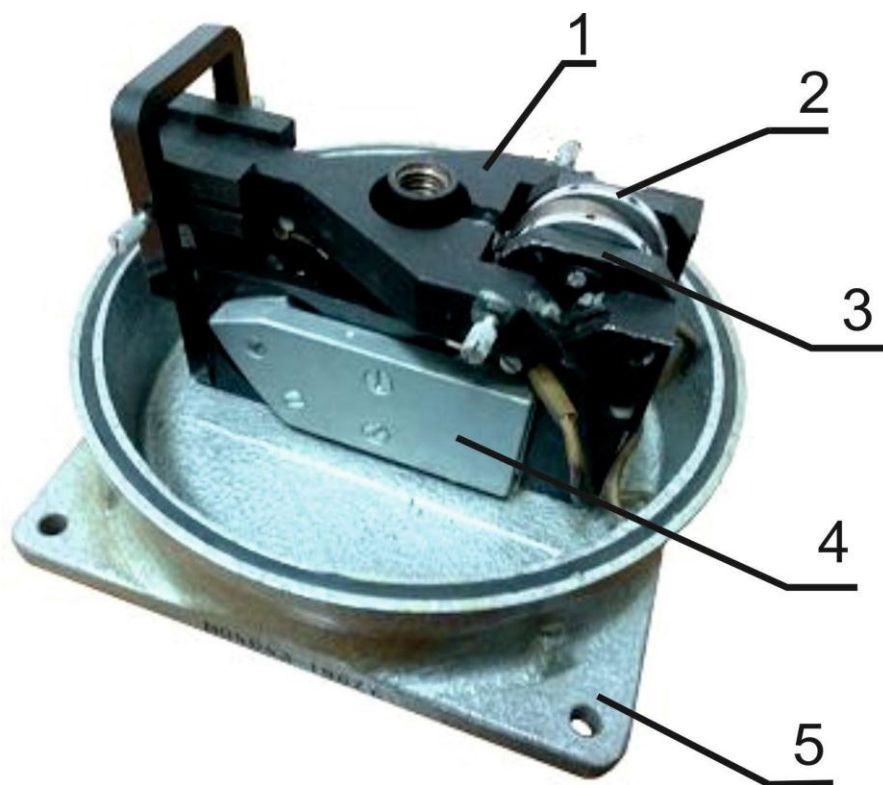


Рис.4.1. Загальний вигляд сейсмоприймача ВИБ-А

### 4.1. Технічні характеристики

Динамічний діапазон зсуву, мм ..... до +/- 10

Частотний діапазон, Гц ..... 5 – 200

Діапазон швидкостей, см / с ..... 0,1-10

					Арк.
					42
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата	

Період власних коливань, з ..... 0,4  
 Наведена довжина маятника, см ..... 7 - 10  
 Чутливість котушки, МВС / см ..... 8-10

#### 4.2.Опис конструкції

Прилад ВИБ - А (рис. 1.6) має вільний хід хитання маятника  $\pm 10$  мм. При необхідності для реєстрації великих переміщень приведена довжина маятника може бути збільшена в 3,5 або 10 разів, що дозволяє проводити вимірювання швидкості коливань при зміщенні підстави приладу на  $\pm 30$ ;  $\pm 50$ ;  $\pm 100$  мм.

Зміна приведеної довжини маятника досягається за допомогою установки змінного противага. Для кожного приладу є три вантажі противаги.

Магнітна система сейсмоприймачі складається з постійного магніту (4), виконаний зі сплаву залізо. Між полюсами є повітряний зазор 3 мм, в якому переміщається плоска фігурна індукційна котушка. Робочий орган пристрою розміщені в герметичному корпусі.

Перевірка стану маятника (1) проводиться в режимі вільних коливань; при нормальному положенні повинно бути не менше 100 вільних коливань. Регулювання люфту в підшипниках проводиться затягуванням шайби (2) на тубусі або гвинтом (3) на підшипниках.

Прилад не має додаткового загасання, в зв'язку з чим в спектрі коливань не повинно бути складових, близьких до періоду власних коливань сейсмоприймачі.

						Арк.
						43
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

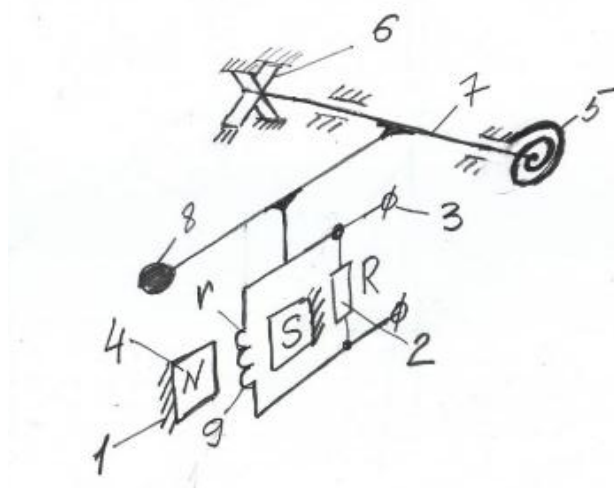
## Розділ 5. Розрахунок основних елементів сейсмоприймача

Конструкцію сейсмоприймачів електродинамічного типу можна уявити, як таку, що складається з механічної та електричної частини.

Механічна (маятникова) система складається з маятника 7, який включає інерційну масу 8, корпус маятника 7 і пружні елементи системи підвісу 6 і 5.

Електрична система - електромагнітний перетворювач, складається з обмотки котушки 9, що знаходиться в магнітному полі постійних магнітів 4, шунт 2 і лещат 3 для підключення сейсмоприймачі до реєстратора коливань.

На рис. 5.1 наведено розрахунковий ескіз пристрою. Вібродатчик призначений для вимірювання амплітуди коливань землі. Для вимірювання амплітуд вертикального напрямку датчик розташовується вертикально. Сейсмічна маса, що складається з постійного магніту з полюсними черевиками і укріплена на пружинах повинна мати частоту власних коливань, в 2,5 - 3 рази меншу частоти коливань землі. В цьому випадку при вібраціях земля переміщує корпус датчика з котушкою, а магніт залишається нерухомим.



**Рис.5.1** Кінематична схема сейсмоприймача електродинамічного типу

1. Частота власних коливань магніту.

					Арк.
					44
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата	

Ця частота знаходиться із співвідношення:

$$f=12c \cdot m \quad (5.1)$$

де:

$c$  - жорсткість пружини, кгс / м;

$m$  - маса всіх частин, пов'язаних з магнітом, кгс/сек<sup>2</sup>м .

2.Довжина провідників, що перетинаються полем. Вся котушка складається з обмотки з числом витків  $n$ .

Активна довжина обмотки:

$$l_a=2hl_k2Rc \quad (5.2)$$

де:  $\omega / l_k$ -число витків на одиницю довжини котушки.

У даній конструкції  $\omega = 2500$ ;  $l_k = 14.1$ мм.

3. Відносна швидкість коливального зміщення котушки.

Амплітудне значення цієї швидкості  $m$ ; При максимальному значенні зсуву  $X_m$  визначається зі співвідношення:

$$m= 2fX_m \quad (5.3)$$

Якщо прийняти  $X_m= 1$ ,  $m_k = 110$ -6м, частоту вібрацій  $f= 50$  Гц,  
то  $m= 250110$ -6=3,1410-4=4,8710<sup>-3</sup> кг.

Ем- максимальне значення ЕРС на виході, що визначаються швидкістю коливального зміщення котушки і поля магніту. Для визначення величини зміщення  $X_m$ , треба інтегрувати отримане значення.

4. Інтегруючий контур виконується зазвичай у вигляді контуру RC. На вхід контуру подається напруга виходу перетворювача.

Рівняння контуру:

$$E(t)=U_r+U_c=iR+1C \int dt. \quad (5.4)$$

Для інтегруючого контуру опору  $R$  вибирається в багато разів більшим опору  $1C$ .

Тоді падіння напруги  $U_r \gg U_c$  и значенням  $U_c$  можна знехтувати.

В цьому випадку :

$$i=E(t)R; U_c=1C \int dt=iRCE(t) dt. \quad (5.5)$$

					Арк. 45
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата	

Таким чином, значення  $U_c$  пропорційне інтегралу за часом вхідного сигналу, але ослабленому в  $RC$  раз, а в разі, коли вхідний сигнал є гармонійним коливань,

$$E = E_m \sin t; \quad (5.6)$$

Це послаблення буду в  $RC$  раз.

При ємкості  $c = 2$  мкФ:

$$1C = 1063142 = 1590 \text{ Ом}, \quad (5.7)$$

Загальна омичний опір обмотки обох котушок  $R_o = 5200 \text{ Ом}$

Задаючись відношенням  $R1/C=7$ , отримуємо :

$$R = 7 * 1590 = 11130 \text{ Ом}. \quad (5.8)$$

Опір контуру:

$$R_k = 11130 - 5200 = 5930 \text{ Ом}. \quad (5.9)$$

$$R_k = 6000 \text{ Ом}.$$

Загальний опір:

$$R = 6000 + 5200 = 11200 \text{ Ом}. \quad (5.10)$$

Включення інтегруючого контуру викликає ослаблення сигналу вібродатчика в 7,05 раз.

5. Результируючі дані :

При  $f = 50$  Гц і амплітудою зміщення  $1$  мк, і напруга на виході перетворювача.

$$E_m = 4,87 * 10^{-3} \text{ В} \quad (5.11)$$

Напруга на виході інтегруючого контуру:

$$E_l = 4,87 * 10^{-3} * 7,05 = 0,691 \text{ мВ} \quad (5.12)$$

						Арк.
						46
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновки

При перевірці сейсмоприймачів виникає ряд труднощів, як у визначенні параметрів при дії вібрації, так і у виділенні корисного сигналу сейсмоприймача. Проведення вимірювань в області низьких частот вимагає забезпечення певних умов для мінімізації впливу зовнішніх факторів на показання приладів. Для визначення параметрів вібрації рекомендується використовувати безконтактні датчики переміщення, а сигнал з сейсмоприймача аналізувати вузькосмуговим спектром. Автоматизація перевірки дозволяє значною мірою знизити час і трудовитрати на даний процес і істотно збільшити продуктивність підприємств. Такий комплекс заходів дозволяє проводити перевірку сейсмоприймачів у всьому робочому діапазоні частот з високою точністю.

В ході дослідження і калібрування даного низькочастотного сейсмоприймача, ми підтвердили його повну працездатність.

						Арк.
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		47

## ЛІТЕРАТУРА

1. Егоров А.А. «Систематика, принцип работы и области применения датчиков». Журнал радиоэлектроники. 2009.№3.
2. Брюль и Кьер Справочник по теории и эксплуатации «Пьезоэлектрические акселерометры и предусилители».
3. А.Бойко, А.Заводян, Б.Симонов. «Микромеханические акселерометры: моделирование элементов конструкции и изготовление» , 2009, № 8.
4. Звягинцев А.М., Красников А.Л., Курносов Н.М. и др. Полевая шина «Fieldbus» - новая перспектива в автоматизации управления технологическими процессами // Датчики и системы . 1999. No7,8.
5. Ф. М. Диментберг и К. С. Колесников «Колебания машин, конструкций и их элементов», Машиностроение, 1980, 295 с.
6. Парасына А.С., Толушкин Г.С., Такшин И.А., Машков Д.В. Интеллектуальные датчики вибрации типа ИЦФР // Датчики и детекторы для АЭЗ «ДДА-ЭС-2004»: Сборник докладов научно-технической конференции – Пенза: ФГУП «НИИ физических измерений», 2004 г. – 298 с.
7. Гольдин А.С. «Вибрация роторных машин» Машиностроение, 1999, 302 с.
8. Балицкий Ф. Я. «Современные методы и средства вибрационной диагностики МиК, 1990.
9. Ицкович Э.Л. Современные интеллектуальные датчики общепромышленного назначения, их особенности и достоинства. // Датчики и системы, 2002. No2.
10. Symmetron Group: Elektronnye komponenty [Electronic componens. Piezoceramics].  
Available at: <http://www.symmetron.ru/suppliers/apc/index.shtml>.
11. Mason W.P. Barium-titanate ceramic as an electromechanica ltransducer // Phys. Rev. 1948. 74. No. 9. P.1 134; Bell labor.Rec.1949. No. 27. P.285-289.

						Арк.
						48
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		



12. Глозман И.А. Пьезокерамика. М.: Энергия, 1972. 288 с.
13. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики // Мир электроники / Под ред. В.М.Шарапова. - М.: Техносфера, 2006.-632 с. ISBN 5-94836-100-4.
14. Пьезоэлектрические приборы для измерения давлений, усилий, ускорений. Проспект фирмы «Kistler Instrumene AG.» 1999. 12 с.
15. Сайт института NIST IEEE-P1451 Draft Standart Home Page <http://https://www.nist.gov/>
16. Панич А.Е., Вусевкер Ю.А., Филиппов Е.В., Пашков С.В., Степанович Д.С. Исследование электрофизических параметров пьезоэлементов из материалов ПКЛ-1, ПКЛ-2, ПКЛ-3 //Международная научно-практическая конференция.
17. Раков В.И., Хиллов В.С. О системном характере изменений функций и структур датчиков // Промышленные АСУ и контроллеры, 2004. №12.
18. Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации //Пьезоэлектрическое приборостроение том III / Под. ред. Панича А.Е. Ростов-на Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. С 335. ISBN 5-87872-351-4.
19. Шарапов В.М., Минаев И.Г., Бондаренко Ю.Ю. и др. Пьезоэлектрические преобразователи (Справочное пособие) / Под ред. В.М.Шарапова. - Черкассы: ЧГТУ, 2004. 435 с.
20. Справочник технолога - машиностроителя. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - М.: Машиностроение, 1985. - Т.1.
21. Гирокоспические системы. Проектирование гирокоспических систем Ч.Ш. Акселерометры, датчики угловой скорости, интегрирующие гирокоспы и гироинтеграторы./ Коновалов С.Ф., Никитин Е.А., Селиванова Л.М. Под ред. Д.С.Пельпора. Учеб.пособие для вузов. - М.:Высш.школа, 1980.
- 22.Никитин Е.А., Балашова А.А., Проектирование дифференцирующих и интегрирующих гирокоспов и акселерометров. – М.: Машиностроение, 1969

						Арк.
						49
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		

						Арк.
Змн.	Ак.	№ докум.	Підпис	Дата		50